

Работа 3.14

Исследование зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля

Оборудование: источник переменного напряжения ВС-24 М, осциллограф, два цифровых вольтметра Щ4313 и М890G, панель с исследуемым образцом, соединительные провода.

Введение

Все вещества, существующие в природе, являются *магнетиками*, т. е. тем или иным способом реагируют на внешнее магнитное поле. Если магнетик поместить в магнитное поле с индукцией \vec{B}_0 , то в нем возникает добавочное поле с индукцией \vec{B}' , которое будет накладываться на первоначальное поле.

Индукция магнитного поля внутри магнетика

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' . \quad (1)$$

Под \vec{B} понимают усредненное значение поля, так как истинное (микроскопическое) поле в магнетике изменяется в пределах межмолекулярных расстояний. Намагничивание вещества характеризуется вектором, который называется *намагниченностью*:

$$\vec{I}_m = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} , \quad (2)$$

где ΔV — физически бесконечно малый объем в окрестности рассматриваемой точки, а \vec{p}_m — *магнитный момент отдельной молекулы*.

В любом магнетике индукция магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{I}_m , \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), H — *напряженность магнитного поля*, \vec{I}_m — намагниченность вещества.

В общем случае направление векторов \vec{H} и \vec{I}_m может не совпадать, однако для большинства веществ намагничивание не зависит от направления магнитного поля. Для изотропного однородного магнетика

$$\vec{I}_m = \chi_m \vec{H} , \quad (4)$$

где χ_m — *магнитная восприимчивость*. Подставляя соотношение (4) в формулу (3), получим:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (5)$$

или

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (6)$$

где $\mu = 1 + \chi_m$ — магнитная проницаемость вещества.

Существуют вещества, в которых \vec{B} совпадает по направлению с \vec{B}' . Такие вещества называются *парамагнетиками* (Al, Sn, Mn и др.). У них $\chi_m > 0$, а $\mu > 1$.

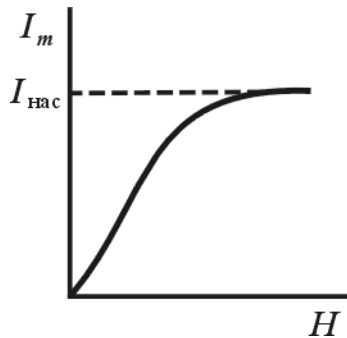


Рис. 3.49

Вещества, в которых \vec{B} и \vec{B}' противоположны по направлению, называются *диамагнетиками* (Cu, Pb, Zn, Au и др.). У них $\chi_m < 0$, $\mu < 1$.

Среди парамагнетиков есть вещества, способные обладать намагничением даже при отсутствии внешнего магнитного поля. По своему наиболее распространенному представителю — железу, они получили название *ферромагнетиков*. К их числу, кроме железа, относят никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами.

Ферромагнетики являются сильно магнитными веществами. В ферромагнетиках $\chi_m \gg 0$, а $\mu \gg 1$. Намагничение пара- и диамагнетиков изменяется с напряженностью поля линейно, а в ферромагнетиках эта зависимость более сложная (рис. 3.49). Уже при напряженности поля порядка 100 А/м намагничение достигает насыщения. Кроме нелинейной зависимости между \vec{I}_m и \vec{H} (или \vec{B} и \vec{H}) для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса. Если ненамагниченный ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле, которое постепенно будет увеличиваться от нуля до H_m , то зависимость $B = f(H)$ выражается кривой OA (рис. 3.50), которая называется первоначальной или *основной кривой намагничения*. Если намагничение довести до насыщения (точка A , рис. 3.50), а затем уменьшать напряженность магнитного поля, то изменение магнитной индукции \vec{B} будет происходить по кривой AD , которая не совпадает с AO . При $H = 0$ магнитная индукция имеет значение OD , которое называется *остаточной индукцией* $B_{ост}$. Для того чтобы индукция B стала равна нулю, необходимо приложить поле противоположного направления напряженностью H_k . Это значение напряженности называется *коэрцитивным полем*.

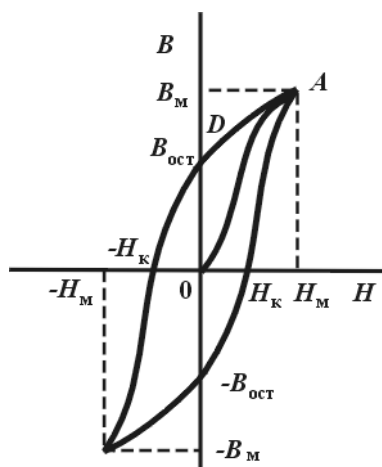


Рис. 3.50

Для того чтобы индукция B стала равна нулю, необходимо приложить поле противоположного направления напряженностью H_k . Это значение напряженности называется *коэрцитивным полем*.

При дальнейшем увеличении напряженности поля до $-H_m$ ферромагнетик намагнитится в противоположном направлении до насыщения ($-B_m$). Если напряженность поля снова уменьшить до нуля, будет наблюдаться остаточная индукция ($-B_{ост}$). При дальнейшем увеличении H индукция снова достигнет значения B_m . Замкнутая кривая $B = f(H)$ называется *петлей гистерезиса*. Если ферромагнетик поместить в переменное магнитное поле, то изменение магнитной индукции будет происходить в соответствии с петлей гистерезиса. Размер петли гистерезиса зависит от того, в каких пределах изменяется H . Если значения H таковы, что возникает насыщение, площадь петли гистерезиса будет максимальной. При меньших значениях H насыщения не происходит. Петля гистерезиса, которая при этом возникает, называется *частным циклом*. Вершины частных циклов располагаются на основной кривой намагничения (кривая OA , рис. 3.50). Из формулы (6) можно выразить магнитную проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (7)$$

Однако по причине того, что между B и H связь неоднозначная, понятие магнитной проницаемости применяют только для основной кривой намагничения. Поскольку основная кривая намагничения OA (рис. 3.50) не является прямой линией, то из (7) следует, что магнитная проницаемость зависит от напряженности поля H ($\mu = f(H)$).

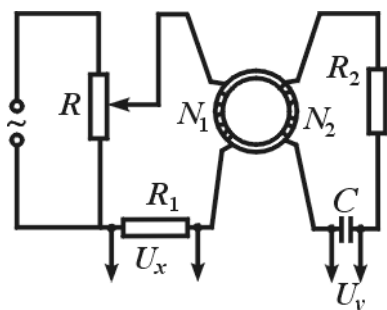


Рис. 3.51

Петлю гистерезиса можно наблюдать на экране осциллографа, если на вертикально отклоняющие его пластины подавать напряжение U_y , пропорциональное магнитной индукции B , а на горизонтально отклоняющие U_x — пропорциональное напряженности магнитного поля H .

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.51. Исследуемый ферромагнитный образец имеет форму тора. На нем две обмотки — первичная N_1 и вторичная N_2 .

Переменный ток, проходящий через первичную обмотку N_1 , создает магнитное поле, напряженность которого

$$H = n_1 i, \quad (8)$$

где n_1 — число витков, приходящееся на единицу длины исследуемого образца.

Напряжение U_x , подаваемое с резистора R_1 на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа,

$$U_x = R_1 i$$

или с учетом (8)

$$U_x = \frac{R_1}{n_1} H. \quad (9)$$

Таким образом, на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение U_x , пропорциональное напряженности H .

При прохождении переменного тока в первичной обмотке во вторичной возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (10)$$

где $\Phi = N_2 S B$ — поток вектора магнитной индукции \vec{B} ; S — площадь сечения исследуемого образца; N_2 — число витков вторичной обмотки.

Ток в цепи вторичной обмотки при условии, что ЭДС самоиндукции мала, $i = \mathcal{E} / (R_2 + R_C)$, где $R_C = 1 / (\omega C)$ — емкостное сопротивление конденсатора.

При условии, что $R_2 \gg R_C$, можно записать: $i = \mathcal{E} / R_2$, а с учетом (10)

$$i = \frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (11)$$

Известно, что $U_y = U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$, или с учетом (11)

$$U_y = \frac{N_2 S}{R_2 C} \int_0^B dB = \frac{N_2 S}{R_2 C} B, \quad (12)$$

это значит, что на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля B .

Таким образом, используя схему, приведенную на рис. 3.52, на экране осциллографа можно наблюдать петлю гистерезиса $B = f(H)$. За один период синусоидального изменения тока в первичной обмотке электронный луч на экране осциллографа описывает петлю гистерезиса, а за каждый следующий период в точности ее повторяет. Именно поэтому на экране наблюдается неподвижная петля гистерезиса.

Если с помощью потенциометра R увеличивать напряжение, подводимое к обмотке N_1 , то будет увеличиваться амплитуда колебаний напряженности поля H , и на экране осциллографа получим последовательный ряд разных по размерам петель гистерезиса. Верхняя точка этих петель гистерезиса находится на начальной кривой намагничивания. Для того чтобы построить кривую намагничивания, необходимо с помощью цифрового вольтметра последовательно измерять U_x и U_y и вычислять значения H и B , используя формулы (9) и (12):

$$H = \frac{N_1}{lR_1} U_x, \quad (13)$$

где N_1 — число витков первичной обмотки, l — длина исследуемого образца;

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y. \quad (14)$$

Следует иметь в виду, что в формулах (13) и (14) U_x и U_y — амплитудные значения переменного напряжения, а цифровой электронный вольтметр показывает их эффективные значения.

Именно поэтому выражения (13) и (14) необходимо записать в виде:

$$H = \sqrt{2} \frac{N_1}{R_1 l} U_x, \quad (15)$$

$$B = \sqrt{2} \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y, \quad (16)$$

где U_x и U_y — показания вольтметров V_1 и V_2 .

Описание установки. Исследование зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости от напряжения магнитного поля производится с помощью установки, схема которой приведена на рис. 3.52. В качестве исследуемого образца используется замкнутый сердечник трансформатора Tr с двумя обмотками: N_1 (намагничивающей) и N_2 (измерительной). Трансформатор закреплен на панели. На этой же панели закреплены резисторы R_1 и R_2 и конденсатор C . Петля гистерезиса наблюдается на экране осциллографа $ОЭ$.

Подводимое к пластинам осциллографа напряжение измеряется цифровыми электронными приборами Щ4313 и М890G. Напряжение, которое подводится к намагничивающей обмотке N_1 , регулируется с помощью источника питания ВС-24М и измеряется вольтметром, закрепленным на его панели. Параметры установки: $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 100$ кОм, $C = 4$ мкф, $N_1 = 400$, $N_2 = 1220$ витков, длина сердечника $l = 0,21$ м, его поперечное сечение $S = 3,6$ см².

Порядок выполнения работы

1. Соберите схему в соответствии с рис. 3.52.
2. Включите вилку шнура осциллографа в сеть 220 В. Ручки «Яркость», «Фокус», «Смещение X», «Смещение Y» установите в среднее положение, «Усиление X», «Усиление Y» — крайнее левое положение, «Диапазон» — в положение «0», «Синхронизация» — в положение «Внутр.», «Ослабление» — в положение «1:1». Включите тумблер «Сеть». Когда на экране появится светящаяся точка, установите ее в центр экрана.

3. Включите в сеть 220 В цифровые электронные приборы Щ4313 и М890G и подготовьте их к измерению напряжений до 5 и 2 В соответственно.

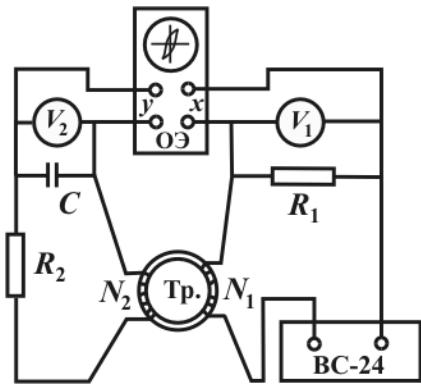


Рис. 3.52

4. Установите ручку источника питания ВС-24М в крайнее левое положение и включите его в сеть 220 В.

5. Подайте на намагничивающую обмотку N_1 трансформатора напряжение 20 — 25 В, вращением ручек осциллографа «Усиление X» и «Усиление Y» получите петлю гистерезиса, добейтесь, чтобы она заняла почти весь экран.

6. Уменьшите напряжение U , подводимое к намагничивающей обмотке N_1 , до нуля и затем последовательно увеличивайте его до максимального значения. Через каждые 1 — 2 В записывайте показания вольтметров U_x и U_y . Результаты измерений запишите в таблицу:

U , В	U_x , В	U_y , В	H , А/м	B , Тл	μ
---------	-----------	-----------	-----------	----------	-------

7. Используя формулы (15), (16) и (7), вычислите H , B и μ и запишите их значения в таблицу.

8. Постройте графики $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

По площади петли гистерезиса сделайте оценку тепловых потерь энергии на перемагничивание.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называют пара-, диа- и ферромагнетиками?
2. Перечислите характерные особенности ферромагнетиков.
3. Что такое магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества?
4. Укажите на кривой $B = f(H)$ область максимального значения μ .
5. В чем заключается суть явления гистерезиса?
6. Почему отклонение электронного луча на экране осциллографа по горизонтали пропорционально H ?
7. Что называют коэрцитивным полем?

8. Какие ферромагнетики называются мягкими и жесткими и где они используются?

9. Почему отклонение электронного луча на экране осциллографа пропорционально B ?

10. Можно ли в этой работе определить величину коэрцитивного поля и остаточную индукцию?